

**Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Львівська політехніка»**

ЗАЯРНИЮК ПАВЛО МИХАЙЛОВИЧ

УДК: 621.396.6.004.15

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОЦІНЮВАННЯ НАДІЙНОСТІ
РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ АПАРАТУРИ З УРАХУВАННЯМ ОСОБЛИВОСТЕЙ
ДРЕЙФІВ ПАРАМЕТРІВ І СТАТИСТИКИ ВІДМОВ**

05.12.13 – радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів – 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Національному університеті «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Недоступ Леонід Аврамович,
Національний університет
«Львівська політехніка»,
професор кафедри теоретичної радіотехніки
та радіовимірювань.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Політанський Леонід Францович,
Чернівецький національний університет
імені Юрія Федьковича,
завідувач кафедри радіотехніки
та інформаційної безпеки;

кандидат технічних наук
Федула Микола Васильович
Хмельницький національний університет,
старший викладач кафедри
фізики та електротехніки.

Захист дисертації відбудеться «02» червня 2017 року о 12⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.10 у Національному університеті «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. С. Бандери 12, XI навчальний корпус, аудиторія 218.

З дисертацією можна ознайомитись у Науково-технічній бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» (79013, м. Львів, вул. Професорська, 1)

Автореферат розісланий «28» квітня 2017 р.

*Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради к.т.н., доц.*

І. В. Демидов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Питання забезпечення якості та надійності радіоелектронної апаратури (РЕА), як і інших технічних засобів, завжди перебували у центрі уваги науковців та спеціалістів промислових підприємств, про що свідчить значна кількість чинних нормативних документів і публікацій за цією тематикою. Ця проблема характеризується множиною завдань, які вимагають свого розв'язання на всіх стадіях життєвого циклу апаратури.

Роботи Р. Барлоу, Ю. К. Беляєва, Д. В. Гаскарова, Б. В. Гніденка, Т. Д. Голінкевича, В. І. Городецького, А. К. Дмитрієва, Г. В. Дружиніна, К. Капура, Б. А. Козлова, В. Д. Кудрицького, Г. Крамера, Л. Ламберсона, Б. Р. Левіна, В. М. Маркова, А. В. Мозгалевського, В. С. Пугачова, В. А. Острейковського, Ф. Прошана, А. А. Свешнікова, А. Д. Соловійова, І. А. Ушакова, А. В. Федухіна, Р. М. Юсупова та інших дали можливість сформулювати основні підходи до прогнозування показників довговічності та запропонувати аналітичні залежності, які пов'язують надійність РЕА з впливом експлуатаційних навантажень та параметрами фізико-хімічних процесів в конструкційних матеріалах. З розвитком комп'ютерної техніки широкого розповсюдження набули статистичні методи визначення ресурсу РЕА, які потребують опрацювання великого об'єму вхідної інформації, зокрема в працях Я. Б. Шора та інших розроблено методики роботи з вибірками.

Сьогодні, у зв'язку зі складністю технічних систем, які застосовують у різних галузях техніки, питанням оцінювання надійності та безвідмовності приділяють ще більше уваги. Українські спеціалісти під керівництвом В. П. Стрельнікова стандартизували моделі відмов та запропонували множину функцій розподілу нароби до відмови в якості стандартних моделей надійності. Визначення показників надійності за допомогою відповідних моделей розглянуто у наукових публікаціях Б. Н. Ланецького та інших разом із впровадженням перспективних технологій автоматизованого керування процесами проектування і виробництва. Оскільки універсальної моделі відмов не існує, ефективність оцінювання та забезпечення надійності РЕА розглядають як єдине комплексне завдання, яке охоплює всі стадії життєвого циклу апаратури та потребує покрокового вирішення і прийняття оптимального рішення на кожному кроці. Окремі кроки цього процесу розглянуто недостатньо. Так, велика кількість відмов відбувається через дрейф у часі визначальних параметрів РЕА та їх вихід за межі робочої області (поступові та мерехтливі відмови), моделі яких розглянуті у багатьох публікаціях І. Б. Герцбаха, Х. Б. Кордонського, А. В. Михайлова, Є. С. Переверзева та інших. Більшість існуючих статистичних методів дають точкові або інтервальні оцінки працездатності систем, рідко – із застосуванням реальних розподілів імовірностей відхилення параметрів від їхніх номінальних значень, тоді як вплив флуктуаційної складової процесу дрейфу на безвідмовність роботи потребує додаткового вивчення. Незважаючи на те, що загалом математичний апарат оцінювання характеристик флуктуаційних складових є достатньо розвинутий, а саме: у теорії імовірності широковідомою є теорія викидів випадкових процесів, цей математичний апарат раніше практично не застосовували у теорії надійності.

З іншого боку доведено, що понад 50% відмов спричинено виробничими дефектами. Існують моделі перетворення потоків дефектів у потоки відмов, де

окремі дефекти призводять до певних відмов, а коефіцієнти перетворення визначають статистично для певних елементів, вузлів та апаратури загалом, що є недостатнім для нової апаратури, тому питання кількісного оцінювання впливу дефектності на надійність потребує подальшого дослідження.

Таким чином, розроблення методів прогнозування параметричної надійності (ПН) за визначальними параметрами для різних характерів їх дрейфів з урахуванням впливу виробничої дефектності на безвідмовність є **актуальним науковим завданням**, розв'язання якого дасть можливість підвищити ефективність оцінювання надійності РЕА на всіх етапах її життєвого циклу.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тема дисертаційної роботи відповідає науковому напрямку кафедри теоретичної радіотехніки та радіовимірювань Національного університету «Львівська політехніка»: теорія і методи проектування радіотехнічних кіл, систем і комплексів та забезпечення їхньої якості.

Дисертація виконана в межах держбюджетних науково-дослідних робіт:

- «Розроблення методів забезпечення конкурентоздатності радіоелектронної апаратури шляхом комплексної оптимізації процесів виробництва за критеріями якості та раціонального використання ресурсів», 2010–2012 рр., номер держреєстрації 0113U003199;

- «Комплексна оптимізація процесів виготовлення радіоелектронної апаратури за критеріями якості та раціонального використання ресурсів», 2013–2014 рр., номер держреєстрації 0110U001112.

У зазначених науково-дослідних роботах автор брав участь як виконавець.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розроблення методів підвищення ефективності оцінювання надійності РЕА з урахуванням особливостей зміни параметрів в процесі експлуатації та статистики відмов.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні завдання:

- проаналізувати й узагальнити літературні дані щодо методів прогнозування надійності радіоелектронних пристроїв в умовах дрейфів їх параметрів, а також з урахуванням дефектів, допущених під час виробництва;

- обґрунтувати способи покращення оцінки працездатності виробів з урахуванням дрейфу параметрів і розробити методи прогнозування параметричної надійності РЕА при квазідетермінованих та квазістаціонарних характерах процесів дрейфів її визначальних параметрів (ВП);

- дослідити вплив дефектів на надійність РЕА та запропонувати зручні способи для практичного розрахунку цього впливу;

- провести обчислювальну верифікацію та експериментальне дослідження розроблених методів прогнозування параметричної надійності;

- запропонувати конкретні практичні рекомендації щодо використання розроблених методів для підвищення ефективності оцінювання надійності РЕА з урахуванням впливу дефектів на надійність та застосуванням методів прогнозування ПН.

Об'єктами дослідження є процеси і моделі відмов РЕА, що зумовлені дрейфом параметрів та дефектами виробництва.

Предметом дослідження є методи підвищення точності оцінювання та

прогнозування безвідмовності з використанням ідентифікованих моделей відмов, спричинених дрейфом параметрів і дефектами виробництва.

Методи дослідження: теорія надійності, теорія сигналів, теорія викидів випадкових процесів, математичний апарат теорії імовірності – для розроблення методів прогнозування надійності РЕА за визначальними параметрами; методи номографії – для побудови номограми; метод випробовування елементної бази (мікросхема операційного підсилювача) при граничнодопустимій температурі навколишнього середовища – для проведення активного експерименту; методи оброблення статистичної інформації – для проведення пасивного експерименту; програмні засоби: MathCAD, MS Office Excel, STADGRAPHICS – для моделювання та розрахунків, Eclipse MARS 2.0 – для написання і компілювання програми розрахунку ПН та впливу дефектів.

Наукову новизну роботи визначають такі основні результати:

- уперше запропоновано метод розрахунку похибки прогнозування гарантованого часу наробки до відмови, викликаной флуктуаційною складовою у методі квантильних зон, що дало змогу ефективно визначити гарантований час наробки на відмову при різних моделях квазідетермінованих процесів дрейфів ВП;

- уперше запропоновано метод прогнозування мерехтливих відмов РЕА, що базується на основі математичного апарату теорії викидів випадкових процесів і забезпечує прогнозування в умовах квазістаціонарного та стаціонарного процесу дрейфу ВП;

- удосконалено метод прогнозування надійності РЕА за статистикою її дефектності на стадії виробництва, запропоновано графічні матеріали для оперативного розрахунку впливу дефектів на надійність;

- набула подальшого розвитку модель процесів дрейфів ВП РЕА, що враховує розподіли їхніх початкових значень, набуті в процесі виробництва, монотонні зміни їх значень в процесі експлуатації та флуктуаційні відхилення, що виникають під дією внутрішніх та зовнішніх чинників; ця модель, на відміну від відомих, враховує реальні розподіли ВП, чим забезпечено її високу адекватність й ефективність прогнозування надійності РЕА.

Практичне значення одержаних результатів. Застосування результатів дисертаційного дослідження дало змогу підвищити ефективність оцінювання рівня надійності РЕА.

Результати роботи в області прогнозування ПН дають можливість скорегувати параметри апаратури несерійного виробництва з метою підвищення працездатності та зменшення ризику параметричних відмов у межах регламентованого часу наробки до відмови. Розроблені методи прогнозування ПН при різних механізмах дрейфів параметрів РЕА та односторонньому або двосторонньому обмеженні їх значень уможливають прогнозування надійності. Номограма (λ , P)-моделі та розрахунково-графічні залежності дають можливість оперативного визначення інтенсивності відмов за відомої дефектності та навпаки. Запропонований програмний засіб спрощує проведення розрахунків розробленими методами.

Окремі результати дисертаційної роботи впроваджені при виконанні держбюджетних науково-дослідних робіт у Національному університеті «Львівська політехніка»: ДБ/КРИТ «Розроблення методів забезпечення конкурентоздатності

радіоелектронної апаратури шляхом комплексної оптимізації процесів виробництва за критеріями якості та раціонального використання ресурсів» (акт впровадження від 14.04.2014); ДБ/ОПТАН «Комплексна оптимізація процесів виготовлення радіоелектронної апаратури за критеріями якості та раціонального використання ресурсів» (акт впровадження від 25.05.2014 р.). А також – на етапах першого запуску та припрацювання РЕА у виробничому процесі на судноремонтному підприємстві «ASABA» (Екваторіальна Гвінея). Зокрема при будівництві нового корабля застосовано результати досліджень з прогнозування дрейфів визначальних параметрів РЕА, що дало змогу підвищити надійність апаратури радіозв'язку та навігації морського призначення у тропічному кліматі (акт впровадження від 01.05.2014 р.).

Особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота є самостійно виконаним науковим дослідженням. Автором особисто проаналізовано та узагальнено дані літератури стосовно процесів оцінювання надійності РЕА на етапах виробництва та припрацювання; проведено експериментальні дослідження дрейфів визначальних параметрів РЕА; побудовано номограму (λ, P) -моделі зв'язку між імовірностями пропуску дефектів та викликаних ними відмов, часом та інтенсивністю відмов; вибрано та опрацьовано два методи прогнозування надійності за визначальним параметром РЕА; запропоновано алгоритм застосування розроблених методів та номограми в процесі оцінювання і забезпечення надійності; розроблено програмний засіб для проведення розрахунків при оцінюванні надійності РЕА; сформульовано основні положення та висновки роботи. У друкованих працях, опублікованих у співавторстві, автору належать: [1, 4, 7, 9, 13, 14] – дослідження можливості прогнозування при двосторонньому обмеженні квазідетермінованого дрейфу ВП методом квантильних зон, розробка аналітичних залежностей для кубічної апроксимації при експоненційному характері дрейфу ВП, побудова графічних моделей, дослідження похибки гарантованого часу в залежності від коефіцієнтів крутизни; [2, 10] – окремі питання у дослідженні адитивної та мультиплікативної складових дефектності на k -му кроці технологічного процесу; [5, 6, 8, 12] – аналітичні залежності інтенсивності відмов від дефектності та номограма для її розрахунку; [3, 15, 18] – низка рішень, що дають змогу прогнозувати параметри викидів на основі статистичних даних лише про дрейф значення ВП, графічні залежності параметрів викидів від часу для п'яти моделей дрейфу; [11] – алгоритм застосування розроблених методів прогнозування в загальному процесі оцінювання і забезпечення надійності РЕА; [16] – пропозиції про використання квантилів як допускових рівнів для протилежних щільностей розподілу; [17] – пропозиції щодо забезпечення оптимізації технологічних процесів із урахуванням рівня дефектності; [19] – структура графічного інтерфейсу і сукупність класів об'єктів для запропонованого програмного засобу.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідались та обговорювались на VII-ій Міжнародній конференції перспективних технологій та методів «MEMSTECH`2011» (Україна, Поляна, 2011), на 15-му Міжнародному молодіжному форумі «Радиоелектроника и молодежь в XXI веке» (Україна, Харків, 2011), на II-ій Міжнародній науково-практичній конференції «Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки» (Україна, Чернівці, 2012), на 13-й Міжнародній конференції

«Computational Problems of Electrical Engineering» (Poland, Grybow, 2012), на VI-й Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки та інформаційних технологій» (Україна, Запоріжжя, 2012), на Міжнародній конференції «Artificial Intelligence Driven Solutions to Business and Engineering Problems» (Poland, Rzeszow, 2012), на III-й Міжнародній науково-практичній конференції «Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки» (Україна, Чернівці, 2013), на 14-й Міжнародній конференції «Computational Problems of Electrical Engineering and Advanced Methods of the Theory of Electrical Engineering» (Czech Republic, Roztoky u Křivoklátu, 2013), на IV-й Міжнародній науково-практичній конференції «Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки» (Україна, Чернівці, 2014), на XVI Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні інформаційні та електронні технології» (Україна, Одеса, 2015), на Міжнародній науково-практичній конференції «Advanced Methods of the Theory of Electrical Engineering» (Czech Republic, Třebíč, 2015), на V-й Міжнародній науково-практичній конференції «Фізико-технологічні проблеми передавання, оброблення та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах» (Україна, Чернівці, 2016).

Публікації за темою дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи опубліковано у 19 наукових працях: у 7 статтях (4 статті у наукових періодичних виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз та 2 статі у наукових фахових виданнях України, 1 стаття у науковому періодичному виданні іншої держави) та в 12 тезах у збірниках доповідей міжнародних науково-технічних та науково-практичних конференцій.

Структура роботи. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг роботи складає 164 сторінки друкарського тексту, із них 8 сторінок вступу, 112 сторінок основного тексту, 56 рисунків, 9 таблиць, список використаних джерел зі 184 найменувань, 5 додатків на 14 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми; визначено: мету, завдання, об'єкт, предмет і методи досліджень; вказано: наукову новизну та практичну цінність дисертації; зв'язок з науковими програмами і темами; відомості, що стосуються достовірності й обґрунтованості результатів досліджень, реалізації й апробації результатів, публікацій за темою дисертації та особистого внеску здобувача.

У **першому** розділі дисертаційної роботи - «**Аналітичний огляд методів прогнозування параметричної надійності та процесів забезпечення надійності на етапі виробництва**» - оглянуто та проаналізовано відкриті публікації, в яких викладено науково-технічні ідеї та розроблені на їхній основі методи розрахунків надійності РЕА, способи її підвищення та прогнозування.

У сучасних наукових публікаціях забезпечення надійності РЕА розглядається як комплексна проблема, що охоплює етапи проектування, виробництва й експлуатації та потребує ефективного оцінювання і вибору оптимального рішення для кожного етапу. Підходи до побудови моделей надійності ґрунтуються на фізико-

математичному аналізу змінних у часі процесів та параметрів, або безпосередньо на статистичних даних (СД), чільну частину становлять імовірісно-статистичні підходи.

Дрейфи параметрів РЕА довготривалого використання є випадковими процесами з явно вираженими монотонними і флуктуаційними складовими. Враховуючи співвідношення цих складових, такі процеси поділяються на квазідетерміновані, квазістаціонарні та стаціонарні. Існує обмеження у застосуванні наявних теоретичних методів прогнозування надійності РЕА за поведінкою ВП, що зумовлені характером його дрейфу. За відомих умов експлуатації апаратури і відповідних впливів дестабілізуючих факторів стає можливим створення ідентифікованих моделей дрейфів параметрів. Постає завдання розроблення методу прогнозування надійності РЕА з визначенням імовірності безвідмовної роботи і гарантованого часу знаходження параметрів у полі допуску, обмеженому допусковими рівнями (ДР), з кількісним оцінюванням точності прогнозування. Природно виникає ідея запровадити у розрахунки надійності математичний апарат теорії викидів випадкових процесів (ТВВП), який широко застосовують у теорії сигналів. Спроби реалізації, як свідчать наукові джерела, були зроблені, але, через труднощі обчислювального плану, теорія обмежилась стаціонарним випадковим процесом із нормальним законом розподілу. Розвиток сучасної обчислювальної техніки уможливорює застосування положень ТВВП для прогнозування ПН за різних характерів дрейфу ВП.

На теперішній час висунуто концепцію оперативного оцінювання надійності виробів за рівнем поточної дефектності, що ґрунтується на встановлених залежностях потоків відмов апаратури від потоків виробничих дефектів. Використання залежностей показників надійності від рівня дефектності є методологічною основою ймовірнісного підходу до прогнозування надійності у виробництві. Тому постає завдання проведення подальшого дослідження впливу дефектності на надійність РЕА та розроблення зручної методики для розрахунку надійності за рівнем дефектності.

У другому розділі - «**Розробка методів прогнозування надійності РЕА за визначальним параметром**» - описано розроблення методів прогнозування параметричної надійності за ВП для різних характерів дрейфу за умови обмеження значення визначального параметра ДР.

Основою застосованого в роботі підходу до розроблення методів прогнозування є моделювання ВП випадковим процесом, що характеризується своєю напрямленістю. Приклади реалізацій випадкових процесів дрейфу ВП наведено на рис. 1.

Процес дрейфу ВП розглянуто як випадкову функцію $X(t)$:

$$X(t) = X_{\text{мон}}(t) + X_{\text{фл}}(t), \quad (1)$$

де $X_{\text{мон}}(t)$ – монотонна складова, що може бути як випадковою, так і не випадковою функцією, $X_{\text{фл}}(t)$ – суто флуктуаційна складова процесу. Прийнято два ДР значень параметра, що визначають працездатність пристрою, нижній ДР - Δ_1 та верхній ДР - Δ_2 . Імовірність того, що значення ВП ($x(t)$) у момент $t=t_i$ буде більшим за Δ_1 визначається формулою:

$$P(t_i) = P\{X(t_i) > \Delta_1\} = \int_{\Delta_1}^{\infty} f(x/t_i) dx, \quad (2)$$

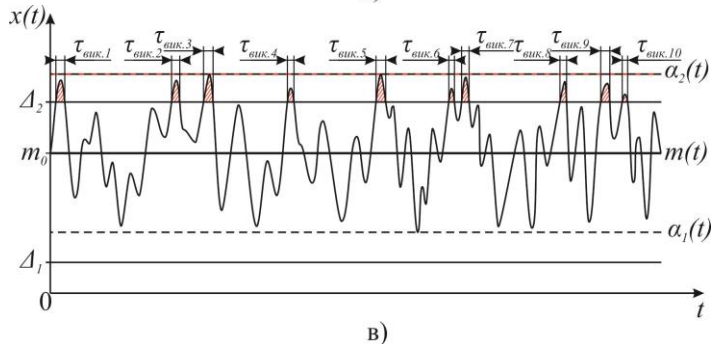
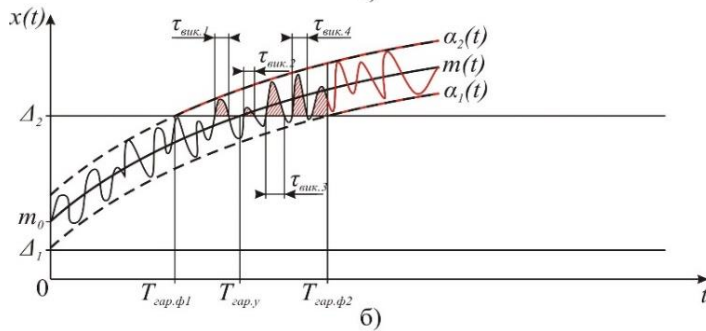
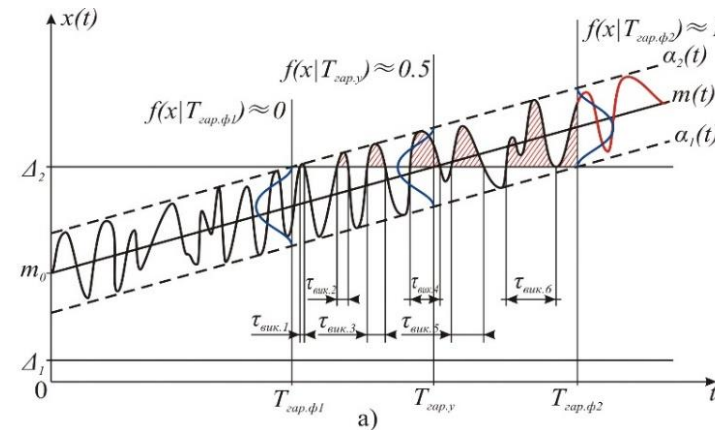


Рис. 1. Приклади реалізації випадкових процесів дрейфу ВП: а), б)

квездетерміновані процеси з різною швидкістю; в) квазістаціонарний процес.

$m(t)$ – математичне очікування значення параметра; $\alpha_1(t)$, $\alpha_2(t)$ – нижній та верхній квантилі; $f(x|T_{zarp.})$ – щільність розподілу параметра x у момент часу $T_{zarp.}$; $T_{zarp.y}$ – середній час наробки до відмови; $T_{zarp.ph1}$ – фактичний гарантований час, визначений за верхнім квантилем; $T_{zarp.ph2}$ – фактичний гарантований час, визначений за нижнім квантилем; $\tau_{vyk.i}$ – тривалість i -го викиду випадкового процесу за ДР.

зон. Використання відомого у математичній статистиці поняття квантиля дало можливість запровадити до розгляду поняття квантильної кривої та квантильної зони, що обмежена квантильними кривими.

Метод квантильних зон уможливує визначення умовного гарантованого часу роботи $T_{zarp.y}$ за математичним очікуванням $m(t)$, а також визначення за допомогою квантилів $\alpha_1(t)$ і $\alpha_2(t)$ інтервалу часу напрацювання, у якому пристрій може виходити

а імовірність того, що у цей момент $x(t) < \Delta_2$:

$$P(t_i) = P\{X(t_i) < \Delta_2\} = \int_{-\infty}^{\Delta_2} f(x/t_i) dx, \quad (3)$$

де $f(x/t_i)$ – щільність розподілу x у момент часу t_i .

Оскільки процес дрейфу є випадковим і має флуктуаційну складову, вихід випадкового процесу за ДР проходить за певний проміжок часу ΔT_{zarp} , який умовно обмежено моментами часу $T_{zarp.ph1}$ (початок виходу процесу дрейфу ВП за ДР) та $T_{zarp.ph2}$ (остаточний вихід ВП за ДР) (рис. 1, а, б). З іншого боку, цей процес можна характеризувати кількістю n та тривалостями $\tau_{vyk.i}$ його викидів за встановлені ДР (рис. 1). Залежно від співвідношення значень $X(t)_{мон}$ та $X(t)_{фл}$ і Δ_1 , Δ_2 , випадковий процес дрейфу ВП може бути квазідетермінованим (рис. 1, а, б), або квазістаціонарним (рис. 1, в), точність прогнозування гарантованого часу роботи залежить від швидкості зміни $X(t)_{мон}$.

З огляду на природу дрейфу ВП, застосовано два окремі підходи до прогнозування ПН. При квазідетермінованих процесах дрейфів параметрів доцільно застосовувати **метод квантильних**

з ладу з подальшим поверненням до робочого стану, а саме – похибку визначення гарантованого часу безвідмовної роботи ΔT_{zap} .

Визначення $T_{zap.y}$ зводиться до встановлення такого значення аргументу функції $m(t)$, за якого воно досягає одного з ДР:

$$T_{zap.y} = arg[m(t) = \Delta]. \quad (4)$$

Гарантований час напрацювання до початку відмови пристрою $T_{zap.\phi1}$ встановлюється за значеннями $\alpha_1(t)$ і $\alpha_2(t)$ з певною імовірністю:

$$T_{zap.\phi1} = arg[\alpha_2(t) = \Delta_2], \text{ або } T_{zap.\phi1} = arg[\alpha_1(t) = \Delta_1]. \quad (5)$$

Використання квантилів $\alpha_1(t)$ і $\alpha_2(t)$ уможливорює встановлення часу повної втрати працездатності пристрою $T_{zap.\phi2}$ з тими ж імовірностями:

$$T_{zap.\phi2} = arg[\alpha_1(t) = \Delta_2], \text{ або } T_{zap.\phi2} = arg[\alpha_2(t) = \Delta_1], \quad (6)$$

для зростаючого та спадного процесів відповідно, за умови, що обидва квантилі перетинають один з ДР.

Зазвичай ΔT_{zap} визначається за наступним виразом:

$$\Delta T_{zap} = T_{zap.\phi2} - T_{zap.\phi1}, \quad (7)$$

у разі відсутності точки перетину другого квантиля з ДР:

$$\Delta T_{zap} = T_{zap.y} - T_{zap.\phi1}. \quad (8)$$

Для розрахунку T_{zap} при експоненційному характері дрейфу параметра було застосовано ітераційний та апроксимаційний способи. Апроксимація експоненційної моделі дрейфу ВП здійснювалась рядом Тейлора, тоді:

$$m(t) = m_0 \cdot e^{-k_1 \cdot t} \approx m_0 + \dots + m_0 \frac{(-k_1 \cdot t)^n}{n!}, \quad (9)$$

де k_1 – коефіцієнт, що характеризує швидкість зміни математичного очікування. При цьому квантильні криві визначаються наступним чином:

$$\alpha_1(t) = m(t) - u(\sigma_0 + k_2 \cdot t), \quad \alpha_2(t) = m(t) + u(\sigma_0 + k_2 \cdot t), \quad (10)$$

де u – значення квантиля для визначеного закону розподілу та заданої довірчої імовірності, k_2 – коефіцієнт, що характеризує швидкість зміни квадратичного відхилення. Графічні залежності $m(t)$, $\alpha_1(t)$ та $\alpha_2(t)$ для експоненційної та апроксимаційних моделей наведено на рис. 2.

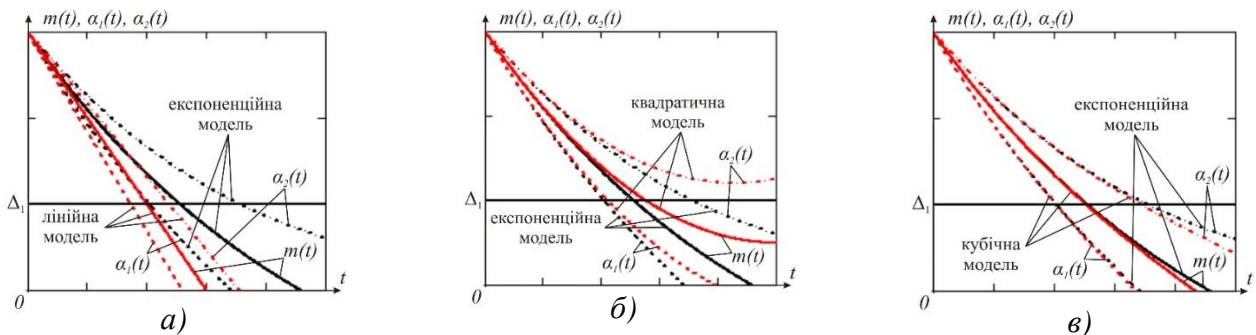


Рис. 2. Часова залежність $m(t)$, $\alpha_1(t)$ та $\alpha_2(t)$ для експоненційної моделі дрейфу ВП і її апроксимацій: а) експоненційна та лінійна моделі; б) експоненційна та квадратична моделі; в) експоненційна та кубічна моделі.

На рис. 3 представлено залежності ΔT_{zap} від коефіцієнтів k_1 і k_2 для кубічної апроксимації.

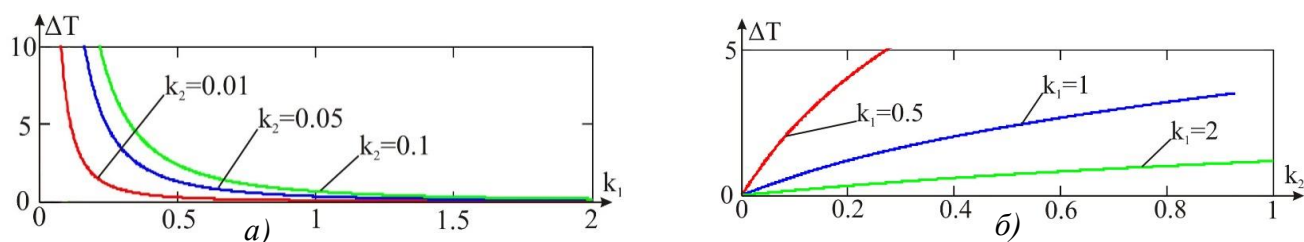


Рис. 3. Залежності ΔT_{gap} від коефіцієнтів k_1 та k_2 при кубічній апроксимації спадного процесу дрейфу параметра: а) $k_2 = 0,01; 0,05; 0,1$, б) $k_1 = 0,5; 1; 2$.

Точність визначення T_{gap} методом квантильних зон є достатньою при квазідетермінованих процесах дрейфів ВП, за умови, що ΔT_{gap} є значно меншим за T_{gap} . Використання цього методу при квазістаціонарних та стаціонарних процесах дрейфу ВП неможливе, оскільки $X_{phi}(t)$ таких процесів є значно більшою за $X_{mon}(t)$. Викиди ВП за ДР, що мають місце при квазістаціонарних процесах дрейфу, важко прогножуються і є причиною мерехтливих відмов, що складають значну частину усіх відмов РЕА.

Для прогнозування надійності РЕА при квазістаціонарному та стаціонарному процесах дрейфів ВП запропоновано метод, що базується на основі теорії викидів випадкових процесів.

Кількості викидів за допустимий рівень уверх та униз відповідно розраховуються з використанням залежностей (11):

$$n(T) = \int_0^T \int_0^\infty v \cdot f(x = \Delta, v, t) dv dt, \quad n(T) = \int_0^T \int_{-\infty}^0 v \cdot f(x = \Delta, v, t) dv dt. \quad (11)$$

Загальна тривалість викидів на певному часовому проміжку T становитиме:

$$t_{вук}(T) = \int_0^T \int_{\Delta}^\infty f(x, t) dx dt, \quad t_{вук}(T) = \int_0^T \int_{-\infty}^{\Delta} f(x, t) dx dt. \quad (12)$$

Середнє значення тривалості одного викиду:

$$t_{сеп}(T) = \frac{t_{вук}(T)}{n(T)}. \quad (13)$$

За умови незалежності швидкості зміни ВП від його значення, двовимірний закон $f(x, v/t)$ розподілу значень параметра та швидкості його зміни у довільний момент часу можна апроксимувати добутком функцій $f(x/t)$ та $f(v/t)$, де x – значення випадкового параметра, v – швидкість зміни значення випадкового параметра. За умови відсутності закону розподілу швидкості його можна замінити законом розподілу того ж виду, що і закон розподілу параметра, або нормальним законом розподілу.

При стаціонарному процесі математичне очікування швидкості дорівнює нулю, при нестаціонарному - його можна записати як похідну від регресії випадкового процесу за часом, тобто:

$$m_v(t) = \frac{dm_x(t)}{dt}. \quad (14)$$

де $m_x(t)$ – математичне очікування значення випадкового параметра x , $m_v(t)$ – математичне очікування швидкості зміни v випадкового параметра x .

Середнє квадратичне відхилення визначається за співвідношеннями, що мають місце для всіх стаціонарних процесів:

$$\begin{cases} \sigma_x^2 = D_x = K_x(0) \\ K_v(\tau) = -\frac{d^2 K_x(\tau)}{d\tau^2}, \\ \sigma_v^2 = D_v = K_v(0) \end{cases} \quad (15)$$

де σ_x , σ_v – середні квадратичні відхилення значення параметра та швидкості його зміни, $K_x(\tau)$, $K_v(\tau)$ – автокореляційні функції значення параметра та швидкості його зміни на часовому проміжку τ , де $K_x(0)$, $K_v(0)$, при $\tau = 0$.

Оскільки значення $K(\tau)$ нас цікавить тільки в околі точки $\tau = 0$, її можна описати лише огинаючими. При проведенні моделювання використано наступний вигляд кореляційної функції:

$$K(\tau) = \sigma^2 \cdot \exp(-a^2 \cdot \tau^2). \quad (16)$$

У разі двостороннього обмеження параметри викидів за ДР визначались наступним чином:

$$n(T) = n_p(T) + n_n(T), \quad t_{vyk}(T) = t_{vyk,p}(T) + t_{vyk,n}(T), \quad t_{ser}(T) = \frac{t_{vyk,p}(T) + t_{vyk,n}(T)}{n_p(T) + n_n(T)}, \quad (17)$$

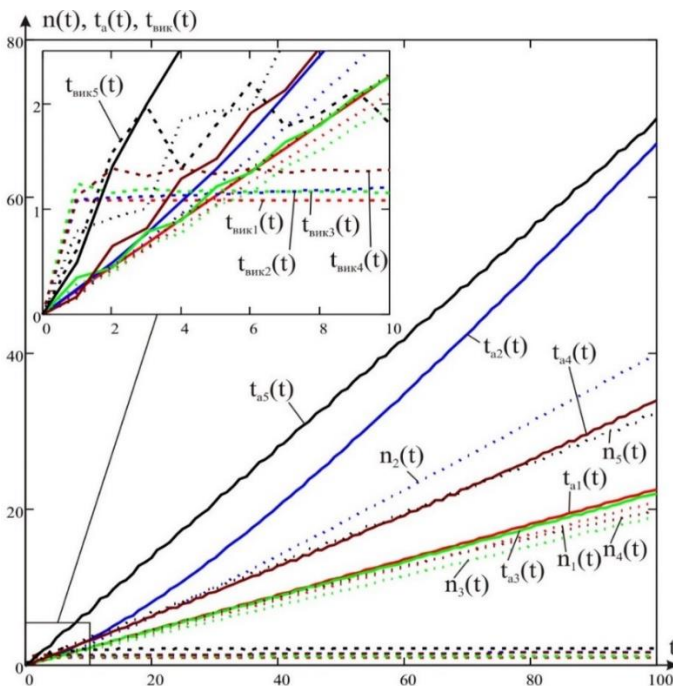


Рис. 4. Часові залежності загальної тривалості викидів $t_{a,i}(t)$, кількості викидів $n_i(t)$ та середньої тривалості одного викиду $t_{vyk,i}(t)$ за обидва ДР, де $i = 1-5$ для кожної з обраних моделей

де $n(T)$ – кількість викидів за ДР; $t_{vyk}(T)$ – загальна тривалість викидів; $t_{ser}(T)$ – середня тривалість одного викиду. Параметри викидів за верхній та нижній ДР розраховувались окремо (індекси p і n відповідають викидам за Δ_2 та Δ_1 , відповідно).

На рис. 4 представлено графічні моделі характеристик викидів ВП за ДР для п'яти різних моделей його дрейфу (стаціонарна у широкому розумінні, стаціонарна у вузькому розумінні, з періодичними складовими та нестаціонарна). Запропонований метод, що базується на основі ТВВП, дає змогу проводити розрахунки кількості та тривалості збоїв, обумовлених короточасними виходами ВП за ДР, та здійснювати прогнозування ПН для всіх видів дрейфів ВП.

У третьому розділі - «Визначення надійності РЕА на стадії виробництва на основі аналізу статистики відмов» - розглянуто особливості формування дефектності та її зв'язок із безвідмовністю апаратури.

Кожен крок технологічного процесу (ТП) характеризується деяким приростом дефектності, що має адитивну і мультиплікативну складові. На рис. 5 наведено

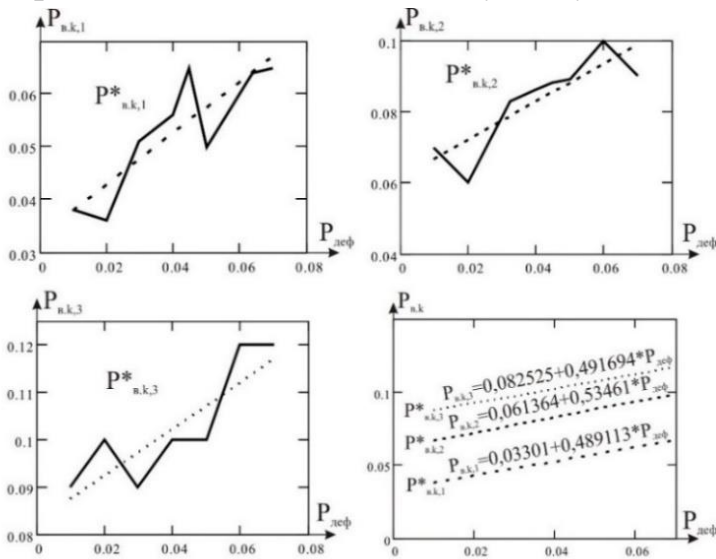


Рис. 5. Залежність імовірності вводу дефектів при нанесенні гальванічних покриттів $P_{v,k,i}$ від дефектності попередніх кроків $P_{def,k-1,i}$ для трьох значень $P_{v,k,i}^*$.

залежності, отримані експериментально-статистичним методом в результаті дослідження процесу нанесення гальванічних покриттів при виготовленні друкованих плат. Із рис. 5 видно, що у багатокрокових процесах приріст дефектності на кожній технологічній операції за рахунок мультиплікативної складової може становити десятки і сотні відсотків від рівня адитивної складової. Таким чином, кожний крок ТП характеризується множиною показників дефектності, що виникає при виконанні технологічної операції під впливом пропущених дефектів попередніх кроків:

$$P_{def,k} = [P_{def,k,1}, P_{def,k,2}, \dots, P_{def,k,n-1}, P_{def,k,n}], \quad (18)$$

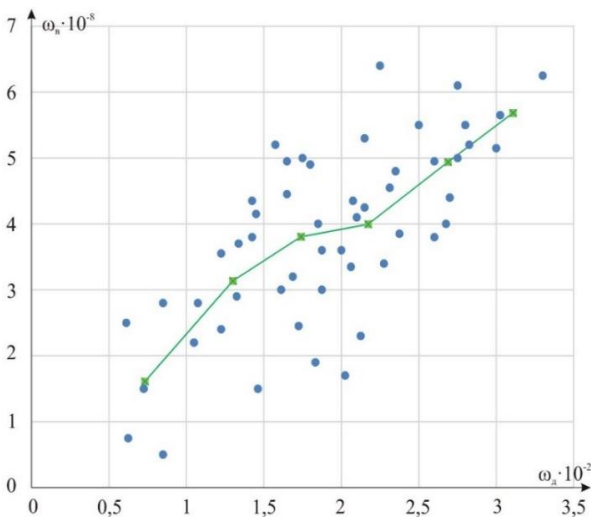


Рис. 6. Поле кореляційного зв'язку між ω_e електронних осцилографів та ω_d пайки елементів.

де $P_{def,k}$ – імовірність наявності дефектів після k -го кроку ТП; $P_{def,k,1} \dots P_{def,k,n}$ – імовірності наявності дефектів після кожної операції на k -му кроці ТП.

Аксіоматичність твердження, що причинами відмов є дефекти, повністю позбутись яких неспроможне жодне виробництво, підтверджується багаточисленними дослідженнями, зокрема, на рис. 6 наведено статистично визначений кореляційний зв'язок між потоками дефектів ω_d та потоками відмов ω_e електронних осцилографів.

Якщо у якості показника надійності виробу прийняти інтенсивність його відмови $\lambda_k(t_p)$, а закон розподілу часу наробки до відмови вважати експоненційним, то отримаємо:

$$\lambda_{k,i}(t_p) = \arg[1 - P_{def,k,i} \cdot P_{відм.}(t_p) = \exp(-\int_0^{t_p} \lambda_{k,i}(t) dt)], \quad (19)$$

де $P_{відм.}(t_p)$ є імовірністю того, що протягом часу t_p дефект виробу призведе до його відмови.

За наявності контролю якості виробів після проведення технологічних операцій з імовірністю правильного контролю $P_{k,i}$, рівняння (19) набуває виду:

$$\lambda_{k,i}(t_p) = \arg[1 - P_{\text{деф.к.і}} \cdot (1 - P_{k,i}) \cdot P_{\text{відм.}}(t_p) - \exp(-\int_0^{t_p} \lambda_{k,i}(t) dt) = 0], \quad (20)$$

звідки при $\lambda = \text{const}$:

$$\lambda_{k,i} = \frac{-\ln[1 - P_{\text{деф.к.і}} \cdot (1 - P_{k,i}) \cdot P_{\text{відм.}}(t_p)]}{t_p}. \quad (21)$$

Отримане рівняння дає змогу оцінювати вплив допущеної дефектності та

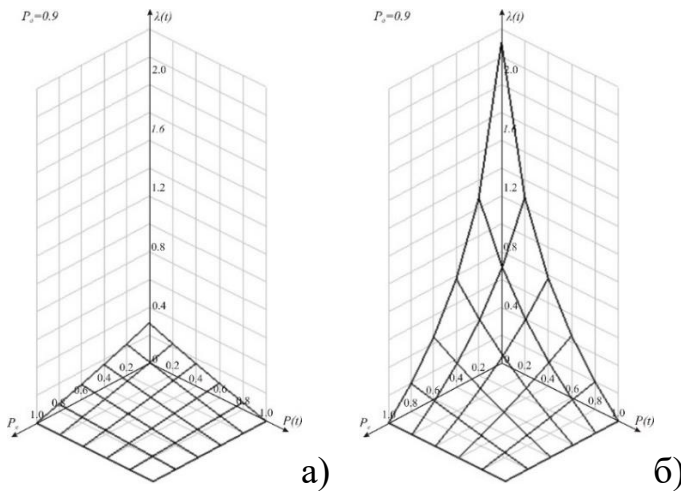


Рис. 7. Залежність $\lambda(t)$ від P_k та $P(t)$ при:
 $P_\delta = 0,25$ - а; $P_\delta = 0,9$ - б.

інтенсивностей відмов, спричинених «власними» дефектами k -го кроку і дефектами, пропущеними з попередніх кроків:

$$\lambda_k(t_p) = \sum_{i=1}^k \lambda_{k,i}(t_p), \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (22)$$

Для реалізації швидкого розрахунку зв'язків між дефектністю та надійністю виробів побудовано номограму (λ, P) -моделі надійності. Оскільки рівняння з чотирма змінними (21) можна розв'язати з використанням номограми, що має дві прямолінійні шкали і одне бінарне поле, було введено допоміжну змінну β , що зв'язує всі чотири змінні попарно згідно з нижче приведеним виразом:

$$\begin{cases} 1 - P_{\text{деф}} \cdot P_{\text{відм}}(t) = \beta \\ e^{-\lambda t} = \beta \end{cases}. \quad (23)$$

Номограма та приклад розрахунку за її допомогою наведено на рис. 8.

Точність обчислення за допомогою графіків та номограм є порівняною з точністю визначення величин за допомогою мір при візуальній реєстрації результатів, натомість швидкість і наочність використання графіків та номограм значно зменшує часові витрати. Результати, отримані графічним способом, можна використати як початкове наближення, а аналітичні залежності - для точного розрахунку.

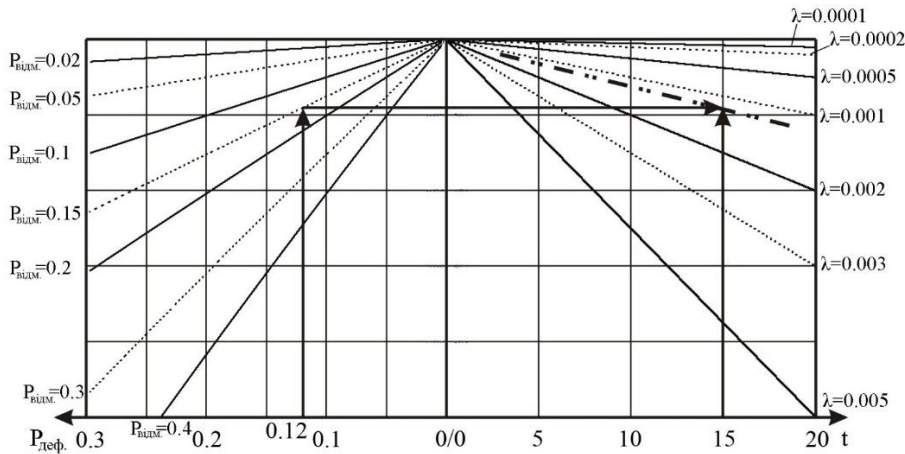


Рис. 8. Номограма для (λ, P) – моделі надійності з прикладом розрахунку.

Наприклад, відомо, що $P_{деф.} = 0,12$; $P_{вдм.} = 0,15$; $t = 15$ од. ч.

Побудовано прямі розрахунку (стрілкою позначено шлях розрахунку).

Знайдено:
 $\lambda = 0,0013$ од./од.ч..

У четвертому розділі - «Перевірка ефективності розроблених методів прогнозування параметричної надійності» - наведено результати прогнозування ПН за статистичними даними, отриманими в ході активного та пасивного експериментів, методами поданими у розділі 2.

Метод квантильних зон застосовано для **індивідуального** прогнозування, визначення гарантованого часу напрацювання кварцового генератора (КГ) за ВП – частотою. Використано СД, отримані відділом технічного контролю підприємства-виробника КГ у результаті тестування на етапі припрацювання.

Побудовано регресії $m(t)$ та $\sigma(t)$ для похибки частоти КГ: $m(t) = m_0 \cdot e^{-k_1 t} + m_1$, $\sigma(t) = \sigma_0 + k_2 \cdot t$, де $m_0 = 0,221$, $m_1 = -0,237$, $\sigma_0 = 0,0037$, $k_1 = 0,0003$, $k_2 = 0,00000002$, $\Delta_1 = 1$ Гц (відповідає стабільності частоти 10^{-6}). Отримано наступні значення $T_{зар}$: при лінійній апроксимації $T_{зар.лін.} = 1,48 \cdot 10^4$ год із похибками $\Delta T_{1.лін.} = 153,85$ год, $\Delta T_{2.лін.} = 154,129$ год, $\Delta T_{лін.} = 307,979$ год; при кубічній апроксимації $T_{зар.куб.} = 1,16 \cdot 10^4$ год із похибками $\Delta T_{1.куб.} = 49,977$ год, $\Delta T_{2.куб.} = 49,487$ год, $\Delta T_{куб.} = 99,454$ год; при квадратичній апроксимації апроксимаційна крива не перетинає ДР. Оскільки отримана на етапі припрацювання статистична вибірка є обмеженою, точність прогнозування є заниженою, проте розраховані значення $T_{зар}$ є відповідними для апаратури такого класу.

Метод квантильних зон було застосовано для **групового** прогнозування ПН групи пристроїв, підсилювачів низької частоти на основі мікросхем ОП за визначальним параметром - коефіцієнтом підсилення за напругою (K_u). Для визначення $m(t_i)$ та $\sigma(t_i)$ при груповому прогнозуванні беруться виміри ВП не за певний період Δt_i , а виміри ВП кожного окремого пристрою із групи в один момент часу t_i . У зв'язку із тим, що один і той самий параметр для різних пристроїв може дрейфувати у різних напрямках, $\sigma(t)$ збільшується при майже незмінному значенні $m(t)$. Так, якщо один з квантилів у деякий момент часу перетне Δ_2 , то інший може перетнути Δ_1 . У такому випадку для здійснення прогнозування $T_{зар}$ можна визначити за квантилями для вибраної довірчої імовірності, визначення $\Delta T_{зар}$ стає неможливим. $T_{зар}$ визначається меншим із значень t у точках перетину квантилів із ДР.

Регресію процесу дрейфу K_u розраховано за СД: $m(t) = m_0 + k_1 t$, $\sigma(t) = \sigma_0 + k_2 \cdot t$, де $m_0 = 309,0547274$, $k_1 = -0,004256171$, $k_2 = (\sigma_{кін} - \sigma_0) / \Delta t \approx 0,00925$. $T_{зар}$ становить близько 5600 год за квантилем α_1 , проте $m(t)$ перетне ДР лише через 26000 год ($\Delta = 200$). Таким

чином, відмови підсилювачів проявляються вже через 5600 год, а через 26000 год відмовляє близько 50 % пристроїв, що збігається зі статистичними даними.

Перевірку методу квантильних зон для групового прогнозування також проведено з використанням статистики дрейфу точності калібраторів електронних осцилографів С1-35, отриманої шляхом пасивного експерименту зі звіту відділу технічного контролю підприємства-виробника. Визначено регресію дрейфу математичного очікування: $m_c(t) = m_0(1 - k_1 t)$, де $m_0 = 2.5$, а $k_1 = 0.002$, а також регресію зміни середнього квадратичного відхилення: $\sigma_c(t) = \sigma_0 + k_2 t$ де $\sigma_0 = 16$, а $k_2 = 0,0066$.

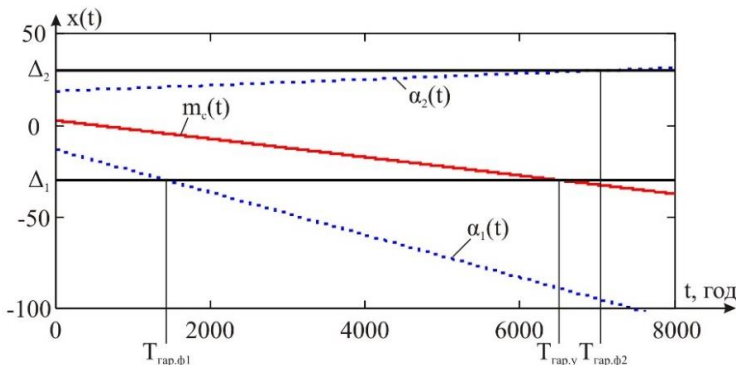


Рис. 9. Прогнозування $T_{гар}$ методом квантильних зон для осцилографів С1 – 35 за ВП – точністю калібратора.

На основі отриманих регресій побудовано модель дрейфу із квантильними зонами та проведено прогнозування $T_{гар}$ для обраних ДР $\Delta_1 = -30$ та $\Delta_2 = 30$ (рис. 9).

Розраховано $T_{гар.ф1} = 1422$ год, $T_{гар.у} = 6500$ год, $T_{гар.ф2} = 7188$ год. Необхідно відмітити, що для цієї статистики дрейфу ВП $\alpha_2(t)$ перетинає Δ_2 , а $\alpha_1(t)$ та $m(t)$ перетинає Δ_1 . Тому $\Delta T_{гар} = T_{гар.у} - T_{гар.ф1} = 5078$ год. За таких умов краще використати метод на

основі теорії викидів, оскільки частина області дрейфу ВП залишається в межах ДР.

Ефективність прогнозування ПН методом, що базується на основі ТВВП, **при мерехтливих відмовах** за ВП для двостороннього обмеження перевірено із використанням СД, отриманих в ході активного експерименту, проведеного на кафедрі теоретичної радіотехніки та радіовимірювань Національного університету «Львівська політехніка». СД щодо дрейфу коефіцієнта підсилення (K_u) низькочастотних підсилювачів на базі мікросхем ОП отримано на установці для пришвидшеного старіння мікросхем. Для K_u одного з підсилювачів маємо наступне рівняння регресії: $m(t) = 102.1518 + 0.000000125 \cdot t$. Значення коефіцієнтів автокореляції $K(\tau)$ дрейфу K_u при зсувах статистичних даних на $\pm 1, \pm 2, \pm 3, \pm 4$ вимірів, наведено у табл. 1.

Таблиця 1.

Значення коефіцієнтів автокореляції дрейфу K_u .

τ , дні	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
$K(\tau)$	0,521391	0,598	0,623816	0,67366	1	0,67366	0,623816	0,598	0,521391

На основі СД отримано параметри для прогнозування: $m(t) = 102,1518 + 0,000000125 \cdot t$; $m_v(t) = 0,00000125$; $\sigma_0 = 1,295697$; $K(\tau) = \sigma_0^2 \cdot e^{-\alpha \cdot \tau^2}$, де $\alpha = 3$. Обрано нормальні закони щільності розподілу ВП та швидкості його зміни. Для наочного представлення значення ДР знаходились у межах процесу дрейфу: $\Delta_1 = 100$, $\Delta_2 = 104$, таке розміщення дає можливість встановити момент виходу процесу дрейфу ВП за них, при цьому кількість та тривалість викидів, на відміну від реальних умов експлуатації, за яких ДР розміщені не ближче, ніж $m(t) \pm 3\sigma$, будуть надзвичайно великими. Отримано аналітичні залежності характеристик викидів. Графічні залежності для вказаної статистики та прийнятих моделей наведено на

рис. 10. Розраховано параметри викидів для різного часу наробки на відмову T (табл. 2). Прогнозування здійснено на проміжку до $T = 8000$ год, проте, за необхідністю, тривалість прогнозування може бути збільшена. Звісно, в реальних умовах експлуатації апаратури тривалість викидів, що визначається значеннями ДР та характеристиками законів розподілу ВП є значно меншою.

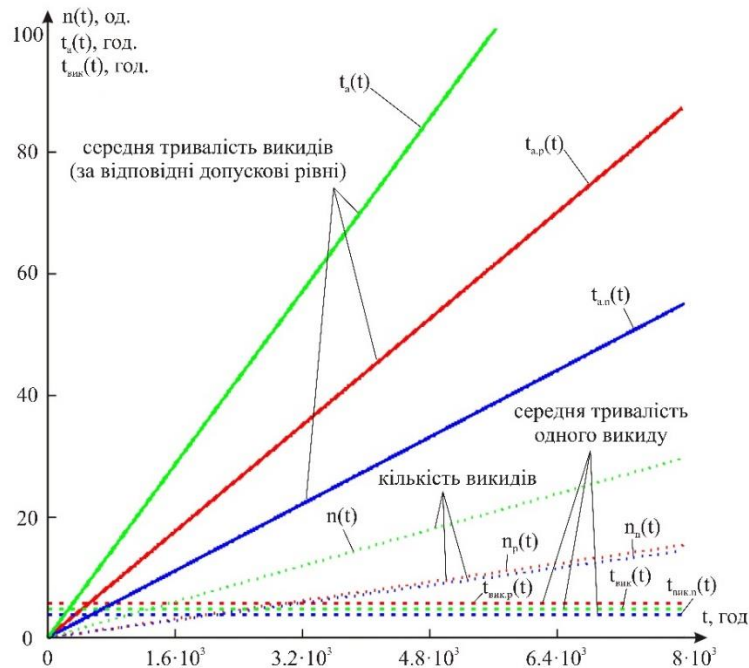


Рис. 10. Часові залежності характеристик викидів процесу дрейфу K_u .

$t_{ар}(t)$ – загальна тривалість викидів за Δ_2 ; $t_{ад}(t)$ – загальна тривалість викидів за Δ_1 ; $t_{ар}(t)$ – загальна тривалість викидів за Δ_2 ; $t_{ад}(t)$ – загальна тривалість викидів за Δ_1 ; $n(t)$ – кількість викидів за обидва ДР; $t_{вир,р}(t)$ – середня тривалість одного викиду за Δ_2 ; $t_{вир,л}(t)$ – середня тривалість одного викиду за Δ_1 ; $t_{вир,л}(t)$ – середня тривалість одного викиду за обидва ДР.

Схематичне зображення запропонованих нововведень у процес оцінювання та забезпечення надійності РЕА представлено на рис. 11. Оцінювання ПН дослідного взірця та готової апаратури та впливу дефектів на надійність РЕА під час оптимізації виробничого процесу проводиться методами, розробленими у розділах 2, 3.

Для полегшення розрахунків та побудови графічних моделей запропоновано програмний засіб (ПЗ), структуру графічного інтерфейсу якого зображено на рис. 12. Як основну мову програмування для цього ПЗ обрано мову Java.

Запропонований ПЗ дає можливість вибрати тип розрахунків (дефектність або прогнозування ПН за ВП), попередньо оглянути модель дрейфу параметра для вибору методу прогнозування ПН та здійснити розрахунки.

Таблиця 2.

Параметри викидів K_u для різного часу наробки на відмову.

T , год	n	$t_{ар}$ год	$t_{ад}$ год
1600	6	228	38,4
4800	18	684	38,4
8000	30	1140	38,4

Аналіз СД дрейфу K_u дозволяє зробити висновок, що, із урахуванням спрощень, котрі зменшують точність обчислень та імовірного характеру розрахованих параметрів викидів, метод є ефективним та придатним для оцінювання надійності РЕА під час її експлуатації.

Придатність розроблених методів перевірено та підтверджено на етапі першого запуску та припрацювання РЕА в роботі судноремонтного підприємства «ASABA» в особливій кліматичній зоні (тропічний клімат, Екваторіальна Гвінея).

У п'ятому розділі - «Застосування розроблених методів та методик у загальному процесі оцінювання і забезпечення надійності РЕА» - запропоновано рекомендації з використання розроблених методів для покращення оцінювання надійності РЕА.

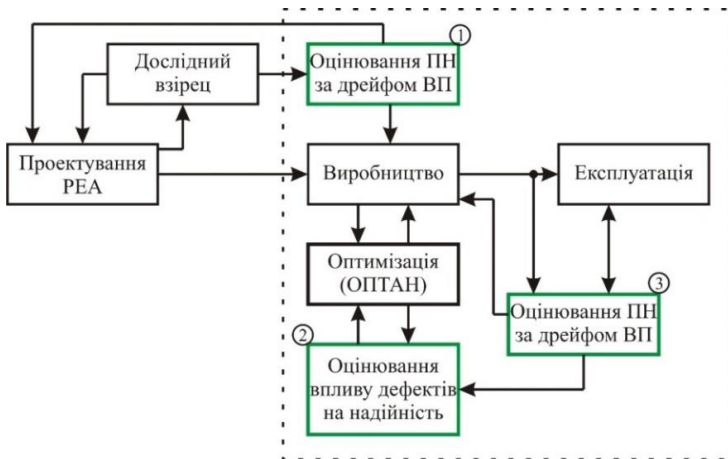


Рис. 11. Основні етапи оцінювання надійності РЕА зі запропонованими додатковими кроками.

1) оцінювання ПН дослідного взірця; 2) оцінювання впливу дефектів на надійність РЕА під час оптимізації виробничого процесу; 3) оцінювання ПН готової апаратури

Необхідно зауважити, що забезпечення надійності відбувається переважно на етапі виробництва, оскільки на етапі проектування закладається теоретичний максимум надійності. Дефекти, що призводять до зменшення надійності, вносяться при виробництві, а всі роботи в цьому напрямку із готовою апаратурою входять у комплекси пуско-налагоджувальних робіт та технічного обслуговування. Розроблені кроки дають змогу підвищити ефективність оцінювання надійності РЕА і, відповідно, почати забезпечувати її ще перед початком



Рис. 12. Структура графічного інтерфейсу ПЗ для запропонованих методів оцінювання надійності.

виробництва, розрахувати вплив дефектів на надійність під час виробництва і зменшити рівень дефектності чи витрати на виробництво, спрогнозувати ПН готового пристрою та здійснити корективи на початку експлуатації, або вплинути на етап виробництва при виготовленні серійної апаратури.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано актуальне наукове завдання розроблення методів прогнозування параметричної надійності за визначальними параметрами для різних характерів їх дрейфів з урахуванням впливу виробничої дефектності на безвідмовність, зокрема:

1. Розроблено метод на основі теорії викидів випадкових процесів для проведення розрахунків кількості та тривалості збоїв, зумовлених короткочасними виходами визначального параметра за допускові рівні при квазістаціонарному або стаціонарному процесі дрейфу. Запропоновано аналітичні залежності для розрахунку кількісних показників збоїв та мерехтливих відмов. Побудовано графічні залежності параметрів викидів у часі вибраних моделей випадкових процесів дрейфів визначальних параметрів, що показують можливість використання методу при різних характерах дрейфів.

2. Запропоновано метод для визначення гарантованого часу наробки до відмови за математичним очікуванням і моментів часу тимчасової та повної втрати

працездатності за допомогою квантилів. Новизна методу квантильних зон полягає в тому, що запровадження понять квантильної кривої та квантильної зони дає можливість урахувати вплив флуктуаційної складової квазідетермінованого процесу дрейфу визначального параметра. Побудовано кубічну апроксимаційну модель; запропоновано ітераційний спосіб розрахунку при використанні неалгебраїчних моделей дрейфу визначального параметра та проведено дослідження похибки гарантованого часу наробки до відмови в залежності від коефіцієнтів зміни монотонної та флуктуаційної складових.

3. На основі дослідження впливів дефектів на інтенсивність відмов розроблено аналітичну модель для її розрахунку, доповнену графіками та номограмою для оперативного аналізу надійності за поточною інформацією про стан конкретного виробництва. Використання номограми дає можливість за інформацію про поточний рівень дефектності та її критичність розрахувати інтенсивність відмов в заданий момент часу за декілька секунд.

4. Придатність та ефективність методу квантильних зон при індивідуальному прогнозуванні параметричної надійності підтверджено експериментально за дрейфом частоти кварцових генераторів: розрахований середній час наробки до відмови становить $1,156 \cdot 10^4$ год для КГ1 і $4,78 \cdot 10^3$ год для КГ2, що відповідає нормам для пристроїв такого класу.

5. Придатність та ефективність методу квантильних зон при груповому прогнозуванні підтверджено експериментально за дрейфом коефіцієнта підсилення підсилювача на основі ОП: час наробки до відмови становить за квантильним рівнем 5600 год, а за математичним очікуванням – 26000 год, що підтверджується відмовою одного з підсилювачів через 6400 год. Додатково підтверджено на статистиці дрейфу точності калібраторів осцилографів С1-35 і визначено такі значення гарантованого часу роботи: $T_{гар.ф1}=1422$ год, $T_{гар.у}=6500$ год, $\Delta T_{гар}=T_{гар.у}-T_{гар.ф1}=5078$ год.

6. Придатність та ефективність методу на основі теорії викидів підтверджено експериментально на статистиці дрейфу коефіцієнта підсилення підсилювачів низької частоти: розраховані параметри викидів випадкового процесу дрейфу (30 викидів тривалістю 1140 год за 8000 год) відповідають експериментально отриманим даним (28 викидів тривалістю 1136 год за 6456 год) для близько розміщених допускових рівнів.

7. Працездатність розроблених методів перевірено і підтверджено на етапі першого запуску і припрацювання РЕА на судноремонтному підприємстві «ASABA» в особливій кліматичній зоні (тропічний клімат, Екваторіальна Гвінея).

8. Розроблено алгоритм застосування запропонованих методів та методик у загальному процесі забезпечення надійності РЕА для підвищення ефективності її оцінювання.

9. Запропоновано програмний засіб для проведення розрахунків розробленими методами, що зменшує час підготовки на 3-10 год та підвищує швидкість розрахунків на 10% у порівнянні з програмним комплексом MathCad.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Bobalo Y. Forecasting the Quasi-Deterministic Parameters` Drifts of Radioelectronics Apparatus on the Basis of Quantile Zones Techniques / Yu. Bobalo, M. Kiselychnyk, L. Nedostup, P. Zayarnyuk // *Przeglad Elektrotechniczny*. – 2013. – № 2a. – P. 270–272.
2. Bobalo Y. Multicriteria optimization of processes for ensuring the quality and reliability of radio electronic devices / Yu. Bobalo, L. Nedostup, M. Kiselychnyk, M. Melen, P. Zayarnyuk // *Acta Technica*. – 2015. – Vol. 60, № 1. – P. 89–96.
3. Недоступ Л. А. Дослідження методу прогнозування мерехтливих відмов побудованого на основі теорії викидів / Л. А. Недоступ, М. Д. Кіселичник, П. М. Заярнюк // *Східно-Європейський журнал передових технологій*. – 2013. – № 6/12(66). – Ч. 2. – С. 116–119.
4. Бобало Ю. Я. Прогнозування параметричної надійності радіоелектронної апаратури при двосторонньому обмеженні дрейфу визначального параметра / Ю. Я. Бобало, А. П. Бондарев, Л. А. Недоступ, М. Д. Кіселичник, П. М. Заярнюк // *Технологічний аудит та резерви виробництва*. – 2015. – № 3/2(23). – С. 79–83.
5. Заярнюк П. М. Номографічний опис (λ, P) -моделі надійності радіоапаратури / П. М. Заярнюк // *Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка»*. Радіотехніка та телекомунікації. – 2011. – № 705. – С. 247–249.
6. Недоступ Л. А. Оцінювання безвідмовності РЕА за рівнем парціальної виробничої дефектності / Л. А. Недоступ, М. Д. Кіселичник, П. М. Заярнюк // *Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка»*. Радіотехніка та телекомунікації. – 2011. – № 705. – С. 230–236.
7. Nedostup L. Research of accuracy of guaranteed operating time prediction by fractile zones method / L. A. Nedostup, M. D. Kiselychnyk, P. M. Zayarnyuk // *Artificial Intelligence Driven Solutions to Business and Engineering Problems*. – Sofia: ITHEA-Publisher. – 2012. – P. 148–158.
8. Nedostup L. Research of REA failures according to their production defectiveness level / L. Nedostup, M. Kiselychnyk, P. Zayarnyuk // *Perspective technologies and methods in MEMS design (MEMSTECH`2011), VII-th International conference, 11–14 May 2011: abstr.* – Polyana - Lviv, Ukraine: Publishing House Vezha&Co. – 2011. – P. 86–87.
9. Bobalo Y. Forecasting the Quasi-Deterministic Parameters` Drifts of Radioelectronics Apparatus on the Basis of Quantile Zones Techniques / Yu. Bobalo, M. Kiselychnyk, L. Nedostup, P. Zayarnyuk // *Computational Problems of Electrical Engineering, 13th International conference, 5–8 September 2012: book of abstr.* – Grybow, Poland. – 2012. – P. 42.
10. Bobalo Yu. Multi-criteria optimization of processes for ensuring of radio electronic devices quality and reliability / Yu. Bobalo, L. Nedostup, M. Kiselychnyk, M. Melen, P. Zayarnyuk // *Computational Problems of Electrical Engineering and Advanced Methods of the Theory of Electrical Engineering, September 4–6, 2013: book of abstr.* – Roztoky u Křivoklátu, Czech Republic. – 2013. – P. V-4.
11. Nedostup L. Optimization of the reliability ensuring of radio-electronic equipment / L. A. Nedostup, M. D. Kiselychnyk, P. M. Zayarnyuk // *Advanced Methods of the Theory of Electrical Engineering (AMTEE`15), 6–8 september 2015: book of abstr.* – Trebich, Czech Republic. – 2015. – P. III-3.
12. Заярнюк П. М. Дослідження системи станів «дефектність – безвідмовність» радіоелектронних пристроїв / П. М. Заярнюк // *15-й Междунар. молодежний форум «Радіоелектроніка и молодежь в XXI веке»: сб. матер.* – Харьков: ХНУРЭ, 2011. – Т. 2. – С. 93–94.

13. Недоступ Л. А. Прогнозування квазідетермінованих дрейфів параметрів радіоелектронної апаратури методом квантильних зон / Л. А. Недоступ, М. Д. Кіселичник, П. М. Заярнюк // Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки та інформаційних технологій, VI Міжнар. наук.-практ. конф. 19–21 вересня 2012 р. : зб. тез. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2012. – С. 266–268.

14. Бобало Ю. Я. Дослідження похибки визначення гарантованого часу роботи при квазідетермінованих процесах дрейфу параметрів / Ю. Я. Бобало, М. Д. Кіселичник, Л. А. Недоступ, П. М. Заярнюк // Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки, II Міжнар. наук.-практ. конф., 25–27 жовтня 2012 р. : матер. конф. – Чернівці: ЧНУ, 2012. – С. 37.

15. Недоступ Л. А. Дослідження методу побудованого на основі теорії викидів для прогнозування мерехтливих відмов / Л. А. Недоступ, М. Д. Кіселичник, П. М. Заярнюк // Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки, III Міжнар. наук.-практ. конф., 24–26 жовтня 2013 р. : матер. конф. – Чернівці: ЧНУ, 2013. – С. 53.

16. Бобало Ю. Я. Розроблення методу прогнозування параметричної надійності сумісно працюючих пристроїв / Ю. Я. Бобало, Л. А. Недоступ, М. Д. Кіселичник, П. М. Заярнюк, П. В. Тарадаха // Фіз.-технолог. проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки, IV Міжнар. наук.-практ. конф., 23–25 жовтня 2014 р.: матер. конф. – Чернівці : Місто, 2014. – С. 46.

17. Тарадаха П. В. Забезпечення раціональних варіантів побудови технологічних процесів / П. В. Тарадаха, А. П. Бондарев, П. М. Заярнюк, Л. А. Недоступ // Фіз.-технолог. проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки, IV Міжнар. наук.-практ. конф., 23–25 жовтня 2014 р. : матер. конф. – Чернівці: Місто, 2014. – С. 125.

18. Заярнюк П. М. Прогнозування надійності радіоелектронної апаратури методом викидів при двосторонньому обмеженні / П. М. Заярнюк, М. Д. Кіселичник, Л. А. Недоступ // МНПК «Современные информационные и электронные технологии», 25–29 травня 2015р. – Одеса. – С. 180–181.

19. Заярнюк П. М. Підвищення ефективності процесу оцінювання надійності радіоелектронної апаратури / П. М. Заярнюк, М. Д. Кіселичник, Л. А. Недоступ // Фіз.-технолог. проблеми передавання, обробки та зберігання інф-ї в інфоком. Сист., V Міжнар. наук.-практ. конф., 3–5 листопада 2016 р.: матер. конф. – Чернівці: Місто, 2016. – С. 55-56.

АНОТАЦІЯ

Заярнюк П. М. Підвищення ефективності оцінювання надійності радіоелектронної апаратури з урахуванням особливостей дрейфів параметрів і статистики відмов. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.13 – радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій. – Національний університет «Львівська політехніка», Міністерство освіти і науки України, м. Львів, 2017.

Дисертаційна робота присвячена розробленню методів прогнозування параметричної надійності (ПН) радіоелектронної апаратури (РЕА) з урахуванням дрейфу її визначальних параметрів (ВП), а також впливу дефектів на неї.

Розроблено методи прогнозування ПН для різних характерів дрейфів ВП: метод квантильних зон при квазідетермінованих процесах дрейфів; метод на основі теорії викидів при квазістаціонарному та стаціонарному процесах дрейфів. Досліджено

вплив дефектів на надійність, розроблено аналітичну та графічні моделі для наочного відображення та швидкого визначення цього впливу. Проведено експериментальне дослідження працездатності методів прогнозування надійності РЕА та підтверджено їх працездатність. Запропоновано алгоритм та програмний засіб для застосування розроблених методів та методик у загальному процесі оцінювання і забезпечення надійності РЕА. Окремі результати застосовано у виробничому процесі.

Ключові слова: надійність, гарантований час наробки до відмови, дрейф визначального параметра, квантильні зони, мерехтливі відмови, дефектність, забезпечення надійності.

АННОТАЦИЯ

Заярнюк П. М. Повышение эффективности оценки надежности радиоэлектронной аппаратуры с учетом особенностей дрейфов параметров и статистики отказов. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.13 – радиотехнические устройства и средства телекоммуникаций. – Национальный университет «Львівська політехніка», Министерство образования и науки Украины, г. Львов, 2017.

Диссертация посвящена разработке методов прогнозирования параметрической надежности радиоэлектронной аппаратуры (РЕА) с учетом дрейфа ее определяющих параметров (ОП), а также влияния дефектов на нее.

Разработаны методы прогнозирования параметрической надежности для различных характеров дрейфов ОП. Метод квантильных зон заключается в определении гарантированного времени наработки на отказ по математическому ожиданию и определению периода времени, в течении которого устройство может выходить из строя и возвращаться в рабочее состояние с помощью квантилей при квазидетерминированных процессах дрейфов ОП. Построены аналитические и графические зависимости погрешности гарантированного срока службы от коэффициентов крутизны дрейфа для линейной, квадратичной и кубической аппроксимации экспоненциальной модели дрейфа ОП и проведен анализ возможностей их применения. Метод, базирующийся на основе теории выбросов, заключается в определении количества и длительностей выбросов случайного процесса дрейфа ОП и предназначен для прогнозирования перемежающихся отказов РЕА при квазистационарном и стационарном процессах дрейфов. Построены графические модели характеристик выбросов определяющего параметра за допусковый уровень для разных моделей его дрейфа и проведена качественная оценка работоспособности метода.

Проведено исследование влияния дефектов на надежность, разработана аналитическая модель для ее расчета, которая позволяет оценивать влияние допущенной дефектности и вероятности контроля на интенсивность отказов, а, следовательно, является полезной при проведении оптимизации процесса производства. Построены графики и номограмма для наглядного отображения этого влияния и возможности его быстрого определения без использования компьютерных средств.

Проведено экспериментальное исследование работоспособности методов прогнозирования надежности РЕА по статистическим данным о дрейфе ОП. Подтверждены работоспособность и эффективность разработанных методов прогнозирования. Время работы, рассчитанное по методу квантильных зон при индивидуальном прогнозировании параметрической надежности кварцевых

генераторов с дрейфом частоты, составляет $1,156 \cdot 10^4$ ч. и $4,78 \cdot 10^3$ ч., что соответствует нормам для устройств такого класса. При групповом прогнозировании методом квантильных зон рассчитанные значения времени наработки на отказ усилителей на основе ОП составляют: по квантильным уровням 5600 ч., а по математическому ожиданию – 26000 ч., что подтверждается отказом одного из усилителей через 6400 ч. Показано соответствие рассчитанных параметров выбросов случайного процесса дрейфа коэффициента усиления усилителя низкой частоты (30 выбросов продолжительностью 1140 ч. за период 8000 ч.) экспериментально полученным данным (28 выбросов продолжительностью 1136 ч. за период 6456 ч.).

Работоспособность разработанных методов проверена и подтверждена на этапе первого запуска и приработки РЭА на судоремонтном предприятии «ASABA» в особой климатической зоне (тропический климат, Экваториальная Гвинея).

Представлен алгоритм применения разработанных методов и методик в общем процессе обеспечения надежности РЭА. Предложенные шаги позволяют спрогнозировать надежность и, соответственно, начать обеспечивать ее еще до начала производства, рассчитать влияние дефектов на надежность аппаратуры при производстве и уменьшить уровень дефектности или затраты на производство, спрогнозировать параметрическую надежность готового устройства и осуществить коррективы в начале эксплуатации, или же повлиять на этап производства при изготовлении серийной аппаратуры.

Для упрощения использования предложенных методов и номограммы разработано программное средство.

Ключевые слова: надежность, гарантированное время наработки на отказ, дрейф определяющего параметра, квантильные зоны, перемежающиеся отказы, дефектность, обеспечение надежности.

ABSTRACT

Zayarnyuk P.M. The effectiveness improving of electronics reliability evaluation considering features of parameters drift and failures statistics. – On the rights of the manuscript.

The thesis submitted in fulfillment of Ph.D. (candidate) degree in technical sciences on specialty 05.12.13 – Radio Engineering Devices and Telecommunication Means. – Lviv Polytechnic National University of Ministry for Education and Science of Ukraine, Lviv, 2017.

The thesis is devoted to the development of parametrical reliability (PR) prediction methods of radio electronic apparatus (REA) considering the drift of the defining parameters (DP) and the influence of defects on it.

Predicting methods of PR for different characters of DP drift have been developed. There are the quantile zones method for quasi-deterministic DP drift processes; the method based on the theory of emission for quasi-stationary and stationary drift process. The influence of defects on the reliability, namely, on the failure rate has been researched. The analytical model and nomogram for calculating failure rate have been built. The experimental research of capacity of REA reliability prediction methods have been done and it's performance has been confirmed. Algorithm of using and respective program realization for using of the developed methods and techniques in the overall process of REA reliability ensuring have been proposed.

Key words: reliability, guaranteed operating time to failure, drift of the defining parameter, quantile zone, shimmering failure, defects, reliability ensuring.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ СКОРОЧЕНЬ

ВП /ОП /DP	Визначальний параметр/Определяющий параметр/Defining parameter.
ДР	Допусковий рівень.
КГ	Кварцовий генератор.
ПН	Параметрична надійність.
СД	Статистичні дані.
ТВВП	Теорія викидів випадкових процесів.
ТП	Технологічний процес.
T_{gap}	Гарантований час роботи (середній час наробки до відмови).
ΔT_{gap}	Похибка визначення гарантованого часу роботи.
Δ_1, Δ_2	Нижній та верхній допустимі рівні відповідно.
$m(t)$	Математичне очікування.
$\sigma(t)$	Середнє квадратичне відхилення.
$\alpha_1(t), \alpha_2(t)$	Нижня та верхня квантильні криві (квантилі).
K_u	Коефіцієнт підсилення за напругою.
$K(\tau)$	Кореляційна функція.